

Результаты расчета коэффициентов абберации представлена в таблице 2.

Таблица 2. Коэффициенты 3-го порядка

B	K	C	D
0	$-\frac{1}{4}$	0	1

Коэффициенты $B = C = 0$, т.е. исправлены сферическая абберация и астигматизм. Присутствуют абберация комы (K), кривизна изображения (D), а также дисторсия.

Абберационные характеристики зеркального объектива с двойным отражением от главного зеркала, рассчитанные в ППП Орал, представлены в таблице 3.

Таблица 3. Абберации (расчеты в ППП Орал)

m	$\Delta S'$	$\Delta Y'$	$\eta, \%$	Z'_m	Z'_s	$\Delta Y', \%$
1	0.000	0.000	0.389	0.148	0.139	0.007

$\Delta S'$, $\Delta Y'$ - соответственно продольная и поперечная сферическая абберация; $\eta, \%$ - неизопланатизм; $\Delta Y', \%$ - дисторсия; - астигматические отрезки.

На рисунках 2 и 3 показано компьютерное моделирование зеркального объектива и диаграмма пятна рассеяния в программной среде Zemax: габаритная схема с ходом лучей и диаграмма пятна рассеяния.

Таким образом получен анастигматический светосильный объектив с большим относительным отверстием, нои малым полем зрения. Такой объектив можно использовать для солнечных телескопов.

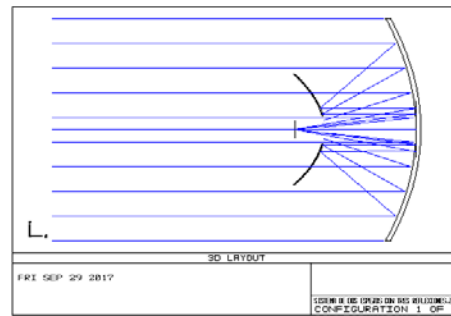


Рисунок 2 – Моделирование анастигматического двухзеркального объектива с тремя отражениями в ППП Zemax

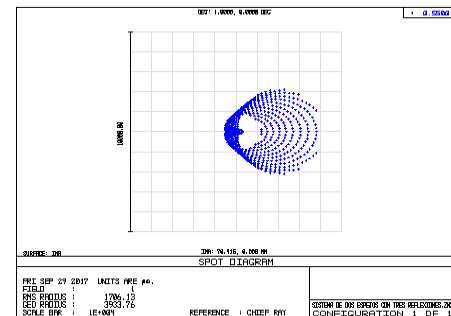


Рисунок 3 – Диаграмма пятна рассеяния анастигматического двухзеркального объектива ($2\omega=12^\circ$) в ППП Zemax

1. Артюхина, Н.К. Теория, методы проектирования и расчет зеркальных систем: монография / Н.К. Артюхина. – Минск: БНТУ, 2009. – 309 с.
2. Русинов М.М. Несферические поверхности в оптике: Расчет, изготовление и контроль. /М.М. Русинов, 4-е изд.– М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2011. – 296 с.

УДК 621.372.821.1

ЛАЗЕРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ НА ЭПИТАКСИАЛЬНОМ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ СЛОЕ $\text{Er}_{1.3} \text{at.}\% \text{:KGd}_{0.2} \text{Yb}_{0.15} \text{Y}_{0.65} (\text{WO}_4)_2$ С РЕЗОНАНСНОЙ НАКАЧКОЙ

Дернович О.П.¹, Курильчик С.В.², Горбаченя К.Н.¹, Кисель В.Э.¹, Кулешов Н.В.¹, Кравцов А.В.³, Гурецкий С.А.³, Колесова И.М.³

¹НИЦ «Оптических материалов и технологий» БНТУ, Минск, Беларусь

²Optoelectronics Research Centre, University of Southampton, UK

³ГНПО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Беларусь

В работе [1] нами сообщалось об успешном росте экспериментального образца эпитаксиального слоя $\text{Er}_{0.01} \text{:KGd}_{0.2} \text{Yb}_{0.148} \text{Y}_{0.642} (\text{WO}_4)_2$ на подложке $\text{KY} (\text{WO}_4)_2$, состав которого, обеспечивающий согласование параметров кристаллической решетки слоя и подложки, был определен с помощью разработанной математической модели, позволяющей рассчитывать параметры кристаллической ячейки и показатель преломления слоя $\text{KGd}_x \text{Yb}_y \text{Y}_{(1-x-y)} (\text{WO}_4)_2$ при различном соотношении ионов Gd и Yb.

В настоящее время методом жидкофазной эпитаксии был получен новый образец монокристаллического слоя состава $\text{Er:KGd}_{0.2} \text{Yb}_{0.15} \text{Y}_{0.65} (\text{WO}_4)_2$ на подложке из кристалла $\text{KY} (\text{WO}_4)_2$, на котором впервые среди эпитаксиальных кристаллических слоев вольфраматов,

легированных ионами эрбия, реализована лазерная генерация.

Отполированный образец слоя толщиной 180 мкм (вдоль кристаллографической оси b) был вырезан вдоль осей оптической индикатрисы кристалла N_m и N_g . Снимок слоя, сделанный через микроскоп Полам РП-1 (ЛОМО), представлен на рисунке 1.

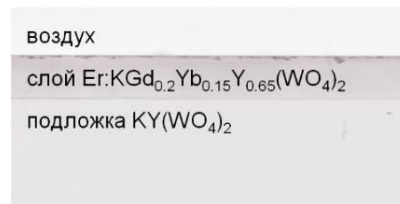


Рисунок 1 – Фотография монокристаллического слоя $\text{Er:KGd}_{0.2} \text{Yb}_{0.15} \text{Y}_{0.65} (\text{WO}_4)_2$, выращенного на кристалле $\text{KY} (\text{WO}_4)_2$

На спектрофотометре Cary 5000 (Varian) был получен спектр поглощения образца, измеренный в спектральном диапазоне 1,45–1,65 мкм для излучения, поляризованного вдоль осей оптической индикатрисы N_m и N_g . На основании сравнения спектров поглощения слоя с литературными данными для объемного кристалла $\text{Er:KY(WO}_4)_2$ [2], было установлено, что концентрация ионов Er^{3+} в образце составляет ~ 1.3 ат. %.

Исследование кинетики затухания люминесценции верхнего лазерного уровня $^4I_{13/2}$ иона Er^{3+} на длине волны 1570 нм проводилось при возбуждении ионов Yb^{3+} лазерными импульсами длительностью 20 нс с длиной волны 975 нм. Кривая затухания люминесценции (рис. 2) хорошо аппроксимировалась моноэкспоненциальной зависимостью с характерным временем жизни 3,4 мс.

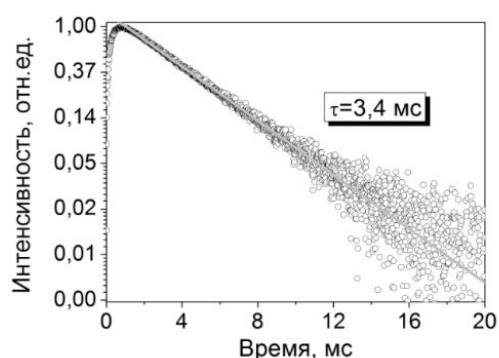


Рисунок 2 – Кинетика затухания люминесценции монокристаллического слоя $\text{Er}(1.3 \text{ ат. \%}): \text{KGd}_{0.2} \text{Yb}_{0.15} \text{Y}_{0.65} (\text{WO}_4)_2$ в области 1,5 мкм

Лазерные эксперименты в режиме непрерывной генерации проводились в четырехзеркальном резонаторе. Схема эксперимента представлена на рисунке 3. Монокристаллический слой $\text{Er}(1.3 \text{ ат. \%}): \text{KGd}_{0.2} \text{Yb}_{0.15} \text{Y}_{0.65} (\text{WO}_4)_2$ на подложке $\text{KY(WO}_4)_2$, вырезанный вдоль оси N_g длиной 7,5 мм, использовался в неволноводном режиме: излучение накачки и генерации проходило внутри слоя без полного внутреннего отражения на границах раздела.

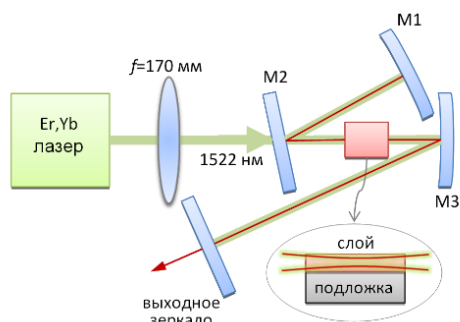


Рисунок 3 – Схема лазерной экспериментальной установки для исследования генерационных характеристик монокристаллического слоя $\text{Er}(1.3 \text{ ат. \%}): \text{KGd}_{0.2} \text{Yb}_{0.15} \text{Y}_{0.65} (\text{WO}_4)_2$

На обе рабочие поверхности слоя и подложки были нанесены просветляющие покрытия, обесп-

печивающие минимальные потери в спектральном диапазоне 1500–1650 нм. Активный элемент был закреплен на медном теплоотводе, охлаждаемом вентилятором. Резонансная накачка активной среды непосредственно на излучающий уровень $^4I_{13/2}$ иона Er^{3+} проводилась с помощью коммерчески доступного Er, Yb -лазера (UAB Optogama), излучающего на длине волны 1522 нм. Линейно поляризованное излучение накачки с близким к Гауссовому профилю ($M^2 < 1,2$) фокусировалось сферической линзой с фокусным расстоянием 170 мм в пятно диаметром 50 мкм (по уровню интенсивности $1/e^2$). Резонатор состоял из двух сферических вогнутых зеркал M1 и M3 с радиусом кривизны 150 и 75 мм, соответственно, которые обеспечивали высокое отражение на длинах волн 1500–1650 нм, поворотного зеркала M2 и плоского выходного зеркала. В роли входного зеркала выступало плоское зеркало M2, которое характеризовалось высоким коэффициентом пропускания на длине волны 1522 нм и высоким коэффициентом отражения для диапазона длин волн 1600–1650 нм. Резонатор был рассчитан таким образом, чтобы диаметр моды резонатора внутри активного слоя был равен диаметру перетяжки пучка накачки. Выходное зеркало было частично отражающим на длине волны 1522 нм, что обеспечивало второй проход излучения накачки через активный кристалл с таким же диаметром пучка.

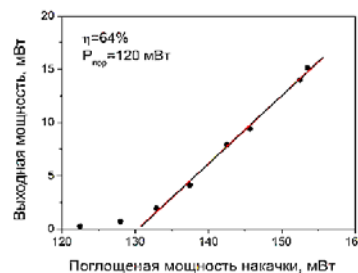


Рисунок 4 – Выходные характеристика лазера на основе монокристаллического слоя $\text{Er}(1.3 \text{ ат. \%}): \text{KGd}_{0.2} \text{Yb}_{0.15} \text{Y}_{0.65} (\text{WO}_4)_2$

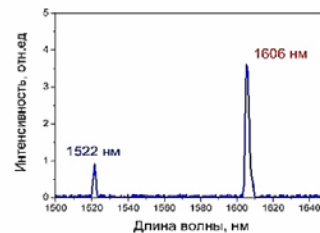


Рисунок 5 – Спектр генерации лазера на основе монокристаллического слоя $\text{Er}(1.3 \text{ ат. \%}): \text{KGd}_{0.2} \text{Yb}_{0.15} \text{Y}_{0.65} (\text{WO}_4)_2$ и прошедшего излучения накачки

В данной конфигурации экспериментальной установки впервые была получена непрерывная генерация в эпитаксиальном кристаллическом слое калий-иттриевого вольфрамата, легированного ионами эрбия. Зависимость выходной мощности лазерной генерации в пленке

$\text{Er}(1.3\text{ат.}\%):\text{KGd}_{0.2}\text{Yb}_{0.15}\text{Y}_{0.65}(\text{WO}_4)_2$ от поглощенной мощности накачки для выходного зеркала лазера с пропусканием 2% на длине волны генерации изображена на рисунке 4.

Изменение мощности накачки осуществлялось с помощью вращающегося нейтрального фильтра переменной плотности так, что параметры излучения накачки внутри активного элемента оставались неизменными. Поглощенная мощность накачки измерялась в условиях генерации, с учетом второго прохода накачки внутри слоя. Наибольшее значение выходной мощности составило 16 мВт на длине волны 1606 нм. Дифференциальная эффективность генерации по поглощенной мощности накачки достигала 64%, порог генерации составил 120 мВт. Спектр генерируемого лазерного излучения наряду с прошедшим излучением накачки был

зарегистрирован с помощью спектрометра APE WaveScan и представлен на рисунке 5.

Полученное значение дифференциальной эффективности генерации превосходит результат, достигнутый ранее с объемным кристаллом $\text{Er:KY}(\text{WO}_4)_2$ [2]. Это свидетельствует о высоком оптическом качестве выращенного слоя и демонстрирует его пригодность для применения в планарном волноводном лазере.

1. Изготовление монокристаллического слоя $\text{Er:KGd,Yb,Y}_{(1-x-y)}(\text{WO}_4)_2$ для планарных волноводных лазеров / О.П. Дернович, С.В. Курильчик, В.Э. Кисель, Н.В. Кулешов, С.А. Гурецкий, И.М. Колесова // 9-ая международная научно-техническая конференция «Приборостроение 2016», Минск, 23–25 ноября 2016 г. / пред. редкол. Гусев О.К. – Минск : БНТУ, 2016. – С. 308-310.
2. In-band pumped room-temperature $\text{Er:KY}(\text{WO}_4)_2$ laser emitting around 1.6 μm / K. Gorbachenya [et.al.] // Laser Physics. – 2013. – Vol.23. – P. 125005.

УДК 681.785.554

СХЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ МНОГОЩЕЛЕВЫХ СПЕКТРОМЕТРОВ С ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКОЙ ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИИ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Гулис И.М., Купреев А.Г., Демидов И.Д.

Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

Спектроскопия с пространственным разрешением (СПР) широко используется в дистанционном зондировании земной поверхности, медицине, сельском хозяйстве, биологии и других областях. Во многих из приложений наблюдаемые объекты нестационарны, поэтому особый интерес представляет разработка подходов с малым временем регистрации, в том числе и обеспечивающих получение полного куба данных $I(x,y,\lambda)$ в одном акте измерения (snapshot hyperspectroscopy [1], или мгновенная гиперспектроскопия – МГС).

Одним из вариантов реализации МГС является формирование проекции куба данных на двумерный фотодетектор как набора спектров от совокупности пространственно отфильтрованных фрагментов объекта (функциональный аналог множества входных щелей дисперсионного спектрального прибора). Таким пространственным фильтром может являться матрица микролинз либо маска, содержащая множество расположенных регулярным образом отверстий [2]. В подобных приборах в качестве дисперсионного элемента обычно используются призмы невысокой дисперсии. При этом если рабочий спектральный диапазон многощелевого дисперсионного спектрометра (МДС) широк, то проблемой становится сильная спектральная зависимость угловой дисперсии призмы. Использование составных призм, скомбинированных в установке с вычитанием дисперсии, позволяет ослабить спектральную зависимость, однако при этом неизбежно существенное снижение общей дисперсии, которая может оказаться недостаточной для получения от отдельных входных щелей

спектров даже небольшой длины в плоскости фотоприемника МДС. Использование дифракционной решетки обеспечивает пренебрежимо малую спектральную вариацию угловой дисперсии даже в широком спектральном диапазоне. Однако установка дифракционной решетки в параллельном пучке, формируемом коллиматорным объективом спектрометра, неприемлема для МДС из-за неэффективного использования площади фотоприемника, так как на детекторе отображаются близко расположенные спектры 0-го и ± 1 -го порядков.

В настоящей работе предлагаются варианты схемных решений МДС с пропускающей дифракционной решеткой, в которых устранена проблема нежелательных порядков, а также обеспечивается возможность оперативного варьирования дисперсии смещением дифракционной решетки вдоль оптической оси. Подход предусматривает расположение пропускающей дифракционной решетки G вблизи щелевой маски M в неколлимированном пучке, в то время как изображение на детекторе P формируется объективом L , находящимся на удалении от решетки (рисунок 1 а). Выбором числовой апертуры формирующих изображение на маске пучков и диаметра объектива L можно блокировать прохождение пучков всех порядков дифракции m кроме первого. Линейная дисперсия такого спектрометра

$$\frac{dl}{d\lambda} = h \frac{d\varphi}{d\lambda} \frac{l}{f} = h \frac{m}{t \cos \beta} \frac{l}{f},$$